基于 ZYNQ 的 CiADS 常温前端加速器的束流信号数据获取系统设计[1]

孙炜[1,2]，郭玉辉[2]，周德泰[2]，王凯丽[2,4]，

陈伟龙[2]，杨济鸣[2,3]，王涛[1,#]

（1. 西北师范大学，兰州 730000；2. 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；3. 中国科学院大学，北京 101400；4. 西北民族大学，兰州 730000）

摘　要：常温前端加速器是 CiADS（China Initiative Accelerator Driven System）超导直线加速器的束流注入器。在束流调试过程中，由于加速器的低能束流感受到空间电荷效应和高频非线性作用最为显著，因此，常温前端加速器的束流品质直接影响整个 CiADS 的性能。本文介绍了一种基于 ZYNQ 嵌入式平台实现的常温前端束流信号数据实时获取与显示系统，该平台通过外接 ADC 采集板卡实时获取不同束流信号探测器转换后的束流数据，同时通过 ZYNQ 嵌入式平台实现所采数据的在线处理和网络上传。其中数据上传功能是通过将 EPICS 的网络传输 IOC 软件移植到嵌入式操作系统中实现。经现场应用测试，该系统能够正确获取常温前端的束流信号数据，并通过上位机界面提供图形化显示和发送内外触发模式的控制参数。整套系统功能集成度高，数据采集实时准确，为后期束流物理实验和束流诊断提供了重要的数据支持和技术保障。

关键词：束流诊断；ZYNQ；数据获取系统；EPICS

中图分类号： TL506　　　文献标志码： A　　　doi：

1 引言

CiADS 的主要目标是建成用于加速器驱动嬗变研究的 ADS（Accelerator Driven

[1] **收稿日期：**xxxx-xx-xx；修改日期：yyy-mm-dd

基金项目：CiADS 名称加速器驱动嬗变研究装置，英文 China initiative Accelerator Driven System，批准号：Large Research Infrastructures China initiative Accelerator Driven System (2017-000052-75-01-000590)

作者简介：孙炜（2000—），男，汉族，江苏盐城人，硕士研究生在读，电子信息专业；E-mail:sw18066166751@163.com

#**通信作者：**王涛，E-mail：wangtao0428@nwnu.edu.cn

Sub-critical System）装置，并能够基于此装置开展超导直线加速器、高功率散裂靶、次临界反应堆等系统稳定、可靠、长期运行[1,2]的科学研究。通常大型加速器在建造和调试前期都需要对束流参数进行采集和分析，常温前端加速器作为 CiADS 低能束流注入器的测试平台，在该平台上进行束流预加速、束流控制和束流诊断等相关实验和测试是必不可少的。常温前端测试平台目前已经完成了整体的搭建和载束测试，整个常温前端主要包括 ECR（Electron Cyclotron Resonance）离子源[3]、低能传输线（LEBT，Low Energy Beam Transport）、射频四极电聚焦加速器（RFQ Radio Frequency Quadrupole）、中能传输线（MEBT，Medium Energy Beam Transport）[4]。为了实时观测束流在运行中的状态，整个常温前端安装了多个束流信号探测器，对这些探测器数据的获取和分析为常温前端加速器的机器运行安全和物理人员的束流研究提供了数据支撑。本设计主要实现对束流信号探测器转换后的束流强度信号进行数据获取、网络传输和上层显示。

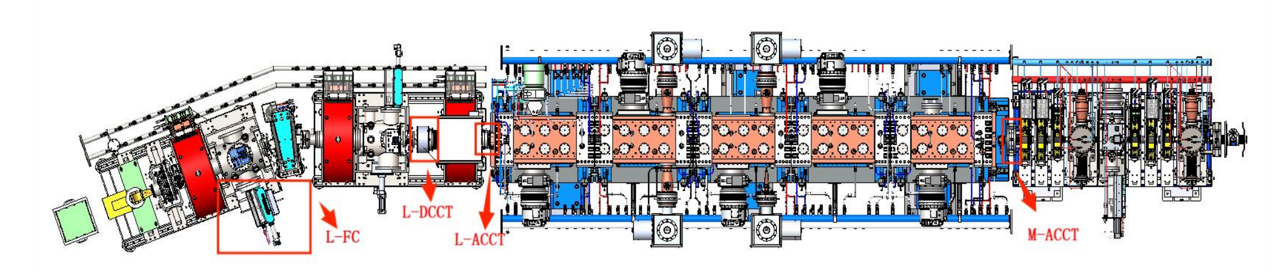


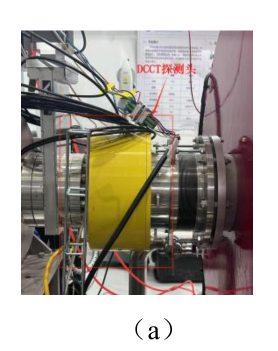
图 1　常温前端加速器设计图

2 束流信号探测器及工作原理

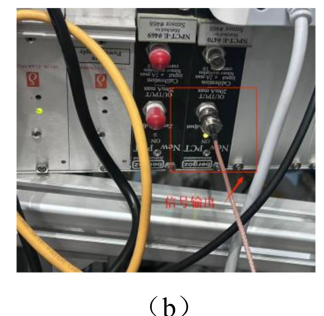
2.1 硬件设备

束流信号类型包括束流位置、束流剖面和束流强度等。束流强度信号是检验离子束束流稳定性的重要参数之一。常温前端加速器上的束流强度探测器分为 DCCT（DCCT,DC current transformer）探测器和 ACCT（ACCT,AC current transformer）探测器，两种探测器均由束流变压器（CT，current transformer）探测头和前端电子学组成。其中 DCCT 探测器用于测量束流中的直流分量；ACCT 探测器用于测量束流中的交流分量，两种束流强度探测器均由 Bergoz 公司生产。

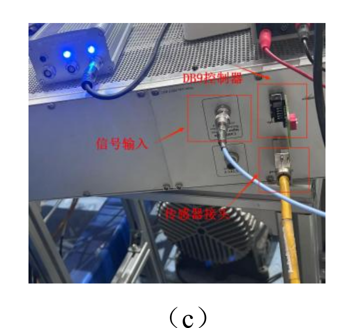
整个常温前端共有 1 个 DCCT 探测器和 2 个 ACCT 探测器分别装配在 LEBT 和 MEBT 段来采集束流原始强度信息。



（a）



（b）



（c）

图 2　DCCT 探测头及前端电子学（a）DCCT 探头（b）电子学前面板（c）电子学后面板

DCCT 探测头安装在常温前端加速器的 LEBT 段。图（a）为安装在常温前端螺线管磁铁之间的 DCCT 探测器的探测头；图（b）图（c）为配套前端电子学前后面板。后面板设有一个 DB9 控制连接器（可调增益放大器）对 DCCT 输入信号范围进行控制，以便使用人员测量不同量程的输入信号。

两个 ACCT 探测头分别安装在 RFQ 的两侧。如图 3 所示，LEBT 段为真空型 ACCT，由于 RFQ 前区域需要严格的真空环境以避免与其他气体分子的碰撞，减少能量损失的可能性，因此使用了真空型 ACCT；而 RFQ 之后束流能量已经显著提高，对真空的要求降低，因此选择更便于安装和维护的法兰型 ACCT。

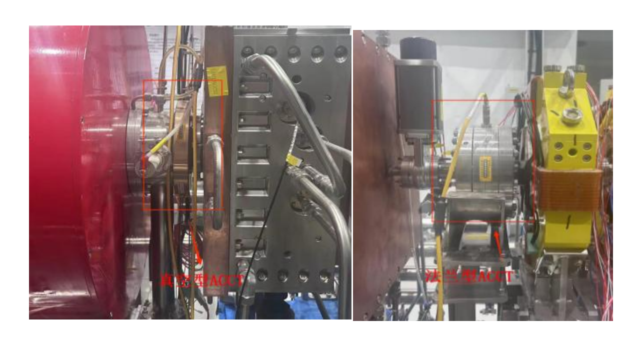




图 3　ACCT 探测头及前端电子学

2.2 工作原理

2.2.1 DCCT 原理

DCCT 实际是一个零磁通变压器，如图 4 所示，其探测器由两个尺寸、磁特性完全相同的磁环组成，磁环上绕有三种线圈。其中激励（调制）线圈串联在两个磁环上，每环的匝数相同，由晶振产生的低频振荡信号通过激励线圈对两个磁环反向激励使其达到

饱和[5,6]。当无束流通过时，两个环形铁上的激励线圈所加的电流大小相同，方向相反，产生大小相同，方向相反的磁场，此时探测器处于零磁通状态，这种情况不存在补偿电流，感应线圈测得无信号输出；当有束流通过时，磁环上激励线圈和束流产生的磁场之和不为 0，此时同步解调器对激励信号的二次谐波分量积分放大送入反馈线圈，产生相应的磁通用以抵消束流产生的磁通，使探头达到新的零磁通状态，通过测量反馈线圈中的电流便可计算出束流的平均流强[7-9]。

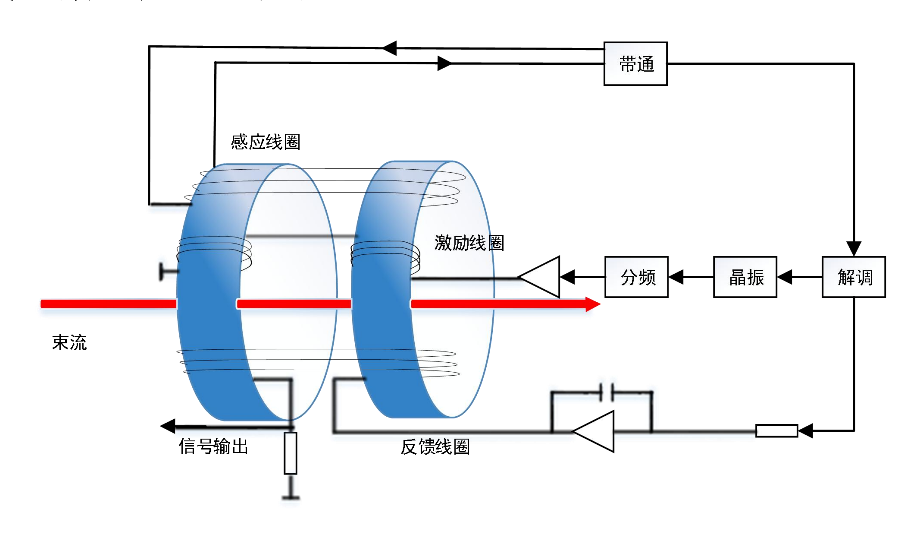


图 4　DCCT 探头及信号处理电子学

2.2.2 ACCT 原理

ACCT 基于电磁感应定律，其探测器由环形铜外壳封装的铁芯和线圈组成。束流穿过铁芯的圆孔可以看作一次线圈，二次线圈绕在铁芯上。当束流信号通过探测器时，由其产生的磁场经过环形磁芯耦合，在二次线圈感应出信号，根据匝数比从而得到被测电流值[10]。

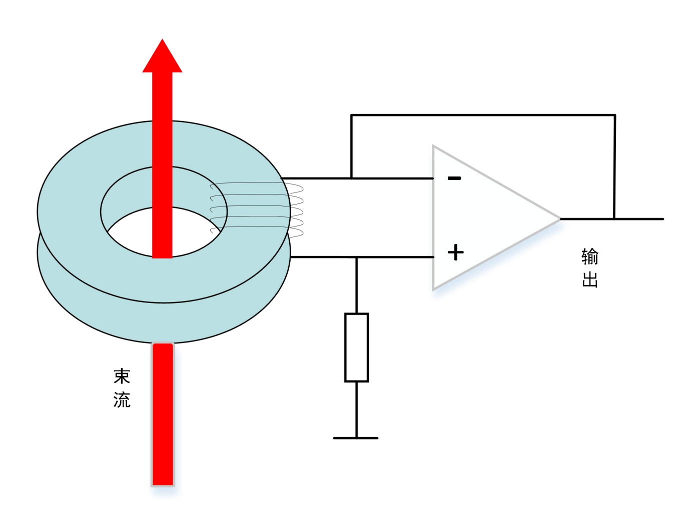


图 5　简易 ACCT 探头结构示意图

3 数据获取系统整体结构设计

数据获取系统整体结构主要包含有数据采集、数据传输和数据显示三个部分。数据采集部分通过模拟信号采集板卡对CT探测器的前端电子学处理过的束流数据进行采集；数据传输部分通过 ZYNQ 内部的 AXI 总线将 PL 端所采集的数据通过 DMA 传输到 PS 端进行处理，并在 PS 端实现 EPICS PV 变量的组装和网络发布；数据显示部分由上位机显示控件接收 PS 端 IOC 打包发送的数据，并通过 Phoebus-CSS 软件实现束流信息的可视化。整个数据获取系统结构如图 6 所示。

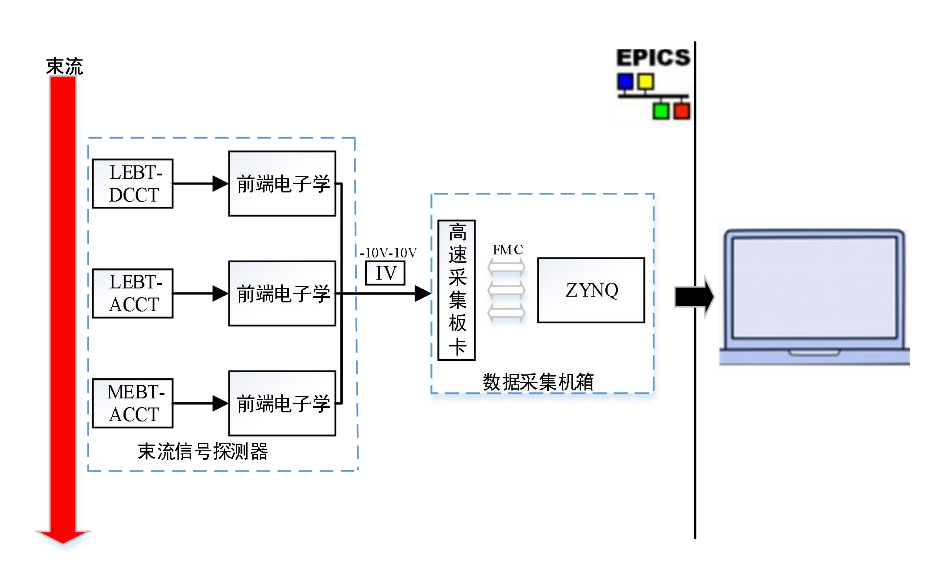


图 6　数据获取系统结构框图

从图 6 中可以看到，由 LEBT 和 MEBT 段的 DCCT 和 ACCT 探测头采集到的原始信号，经过前端电子学系统，将信号放大、过滤和 IV 转换后，变成标准的-10V~10V 信号接入到数据采集机箱。其中 IV 模块由束诊探测器团队设计[1]提供。针对常温前端的束流信号采集设备，数据采集板卡采用拥有更高信号输入范围、通道数更多、分辨率更高的 AD7606C-18；对其它数采场景，比如需要高速、低功耗的磁场场强的采集，一般采用 SAR 型的 AD7960BCPZ 以满足要求。机箱中高速 ADC 采集板卡和 ZYNQ 使用 FMC（FPGA Mezzanine Card）连接器连接，通过对数据采集机箱中 ZYNQ SOC 的 PL 和 PS 端软件编程，可实现对束流信号的数据获取和网络发布，最后将束流数据显示在人机界面中。

4 硬件电子学

ZYNQ SOC 分为 PL（Programmable Logic）部分和 PS（Processing System）部分。PL 是 FPGA 部分，提供可编程逻辑；PS 为嵌入式 CPU，可以在其中运行 Linux 系统。

PL 和 PS 之间通过多个 AXI 总线进行数据的交互和命令的发送[12]。整个硬件电子学由 PL 端负责数据采集和选择内外触发模式；PS 端负责下发命令和运行嵌入式系统，嵌入式系统中运行 EPICS 协议包含的 IOC 将数据发送到控制网络中，最终由上位机获取数据并实现数据的可视化[13,14]。整个 ZYNQ 硬件系统功能结构如图 7 所示。

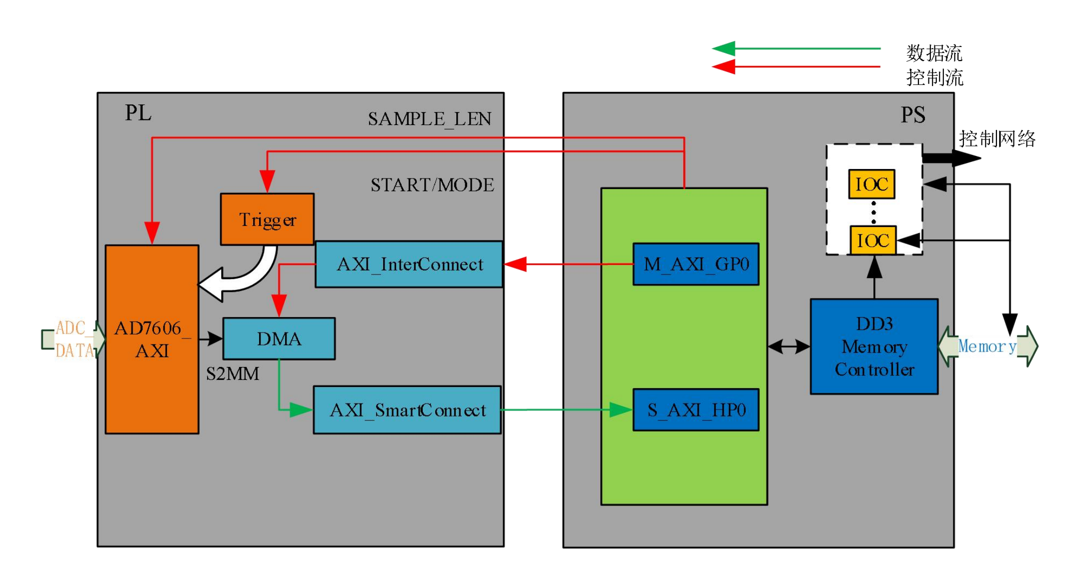


图 7　ZYNQ 硬件系统框图

PL 端通过自定义 IP 核（Intellectual Property）对数据采集模块和触发模式选择模块进行封装。PS 端通过 AXI-Lite 接口向数据采集、触发模式选择和 AXI-DMA IP 核发送命令。当 PL 端的数据采集模块收到采集开始指令和具体采集长度便立即控制 ADC 工作，同时将采集的数据发送到 AXI−DMA IP 核的 S2MM 端口并通过 AXI SmartConnect IP 核发送到 PS 端的 DDR[15]中。

4.1 PL 端设计

4.1.1 数据采集模块

PL 端数据采集模块主要向外接的 AD7606C-18 发出控制指令，并读取八个通道模数转换后的数据。整个 AD7606C-18 采用双极单端输入、并行输出模式对多个束流信号探测器进行数据采集。如图 8 并行模式时序图所示，由 FPGA 给出一个 CONVST 上升沿的信号启动对八个通道数据的依次读取，此时 BUSY 拉高，完成采样后拉低。用户可在 BUSY 拉低后，CS 和 RD 信号同时拉低时读取采集数据[16]。

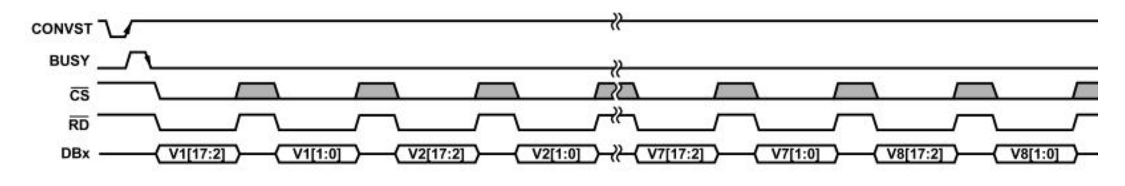


图 8　AD7606C-18 并行模式时序图

在 VIVADO 的具体程序设计时，数据采集模块中使用状态机对八个通道数据依次读取。根据图 8 的时序图，在状态机中需要两个并行帧来读取每个通道的数据。如图 9 所示，以第一通道为例，数据在 READ_CH1 和 READ_CHIS 两个状态中读取。在 READ_CH1 状态下读取第一帧 ADC 数据（位 2 至位 17（MSB））；READ_CHIS 状态下读取第二帧 ADC 数据（位 1 和位 0（LSB））。

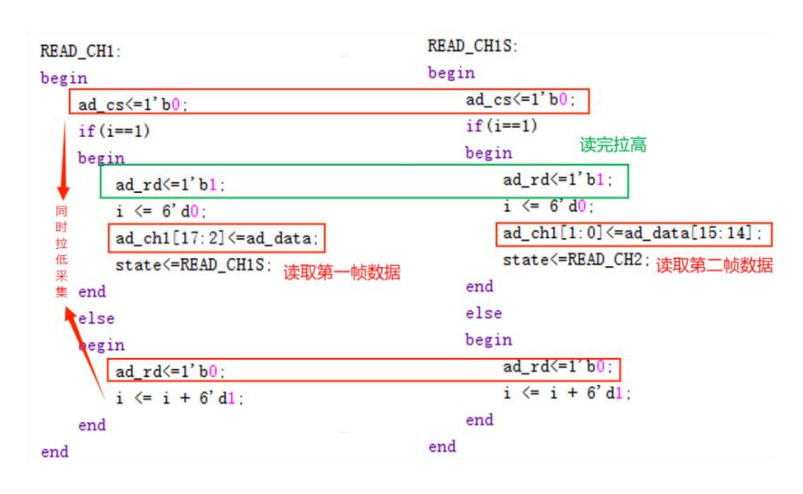


图 9　状态机中读取第一通道数据

4.1.2 触发模式选择模块

在常温前端加速器中利用斩波器了（chopper）实现 us 量级时间结构的束团对相关元件的标定。为了研究人员精确观测到束流信号，束流信号数据获取系统设计了触发模式选择模块用来选择内外触发模式，并在外触发模式时能接收外部同步触发信号，以实现加速器不同束线段信号数据的同步获取。

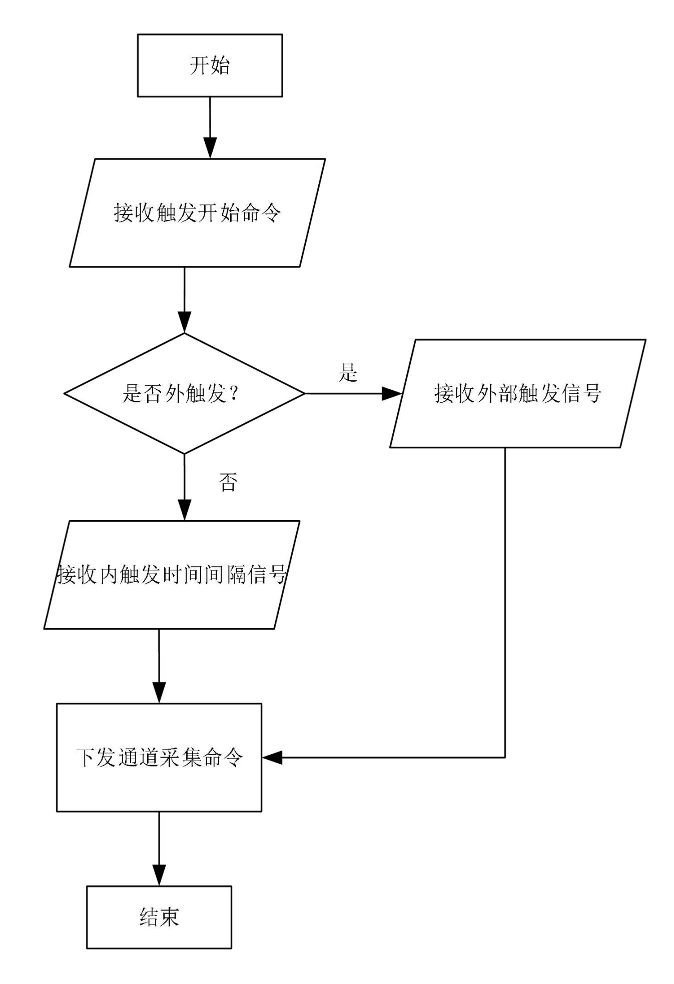


图 10　触发模式选择模块程序流程图

PL 端触发模式选择模块程序流程图如图 10 所示，采集开始前，由 PS 端的应用程序下发触发开始命令和具体触发模式。在常温前端加速器中，LEBT 的法拉第筒（FC，faraday cup）信号数据和 DCCT 探测器信号数据均采用内触发模式进行获取；RFQ 两端的 ACCT 探测器及 MEBT 的 FC 信号数据均采用外触发模式控制同步获取，以便不同束团信号的诊断。

4.2 PS 端设计

4.2.1 系统制作及驱动移植

PS 端的主要工作包括系统裁剪移植、DMA 驱动开发和 IOC 程序设计。整个系统镜像及相关文件都存放在机箱的 SD 卡中，当启动机箱电源时，Ubantu 系统自动从 SD 卡中启动。系统的裁剪移植使用 Xilinx 公司的配套工具 Petalinux 去实现，PL 端在 VIVADO 配置好后，Petalinux 根据 VIVADO 生成的 hdf 文件完成内核、设备树及根文件系统的制作。其中，设备树文件用于系统内核匹配识别 DMA 驱动，并完成 DMA 的初始化和参数配置；根文件系统中的应用程序用于调用 DMA 驱动，实现将传输采集到的数据传送至 DDR。图 11 为应用

程序调用 DMA 驱动完成数据传输的过程。

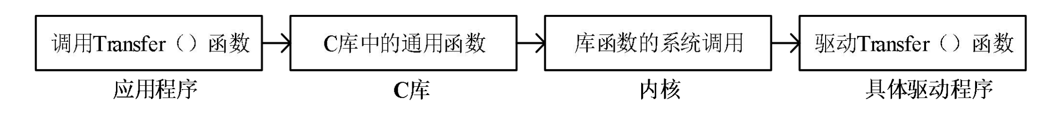


图 11　DMA 传输函数调用过程

4.2.2 EPICS 嵌入式系统设计

上位机的数据传输基于 EPICS 系统架构，在整个控制网络内，只要安装了 EPICS 的设备都可以实现对束流数据的获取。数据获取系统的 EPICS IOC 程序，可以将采集到 DDR 里的数据进行提取并打包成 PV 变量数组，通过以太网发送到控制网络中，控制网络中任意 OPI 界面都可以直接访问 PV 变量，整个 EPICS 软件架构如图 12 所示。

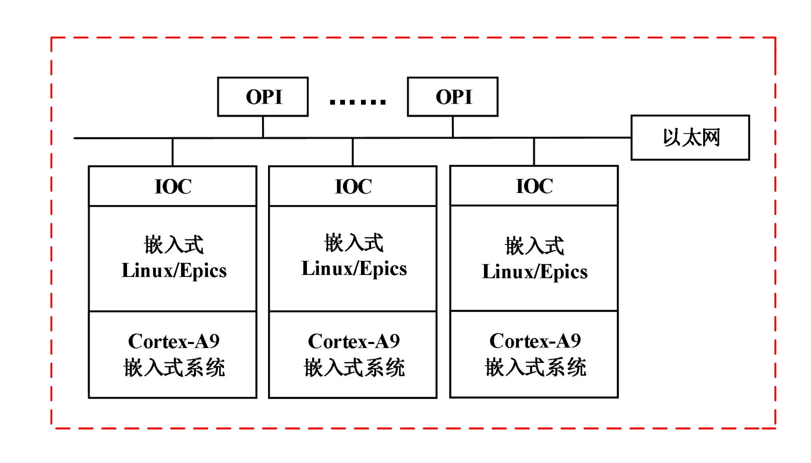


图 12　EPICS 软件架构

5 系统界面设计与系统功能测试

5.1 系统界面

控制系统界面是设备与人的接口，是物理实验人员的“眼睛”。常温前端加速器控制系统中所有的底层程序都需要运行在专用前端服务器上，上层应用尤其是控制界面运行在中控室计算机上，界面的设计需要按照物理实验的需求，以最大程度地帮助操作员和实验人员对实验现象的观测和分析。

整个数据获取系统的 OPI 程序基于 Phoebus-CSS 软件编写，Phoebus-CSS 可以从局域网中获取 EPICS IOC 发布的 PV 变量数组，如图 13 所示，上位机界面设置多个图形控件帮助物理研究人员进行调试和分析工作，物理研究人员可以通过控制界面上的图形控件来下发不同指令给底层硬件设备，以更好地观察常温前端加速器的束流信息。

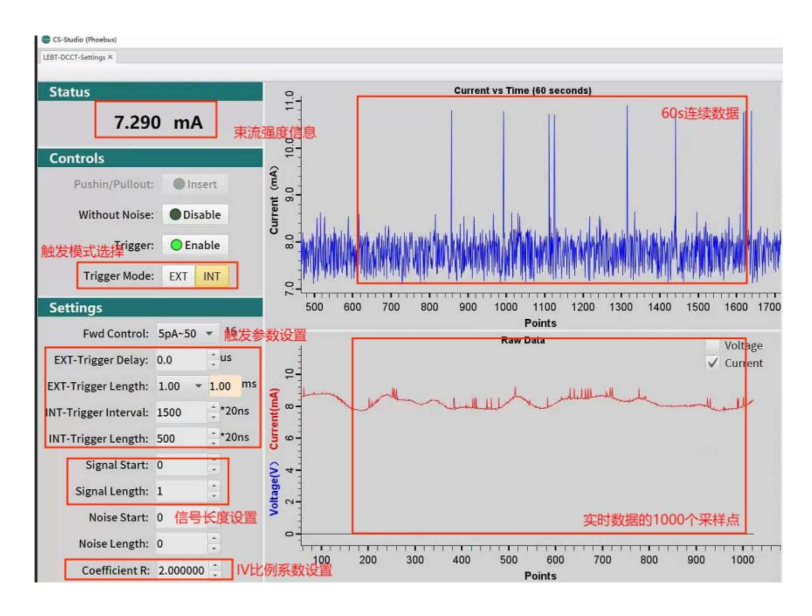


图 13　上位机系统界面

5.2 系统功能测试

整个系统设计已完成信号源仿真测试和现场实际测试。仿真测试使用了信号发生器分别输出±10V、频率 5kHz 和±10V 频率 10kHz 的正弦信号接入到数据采集机箱的第一通道，连接好串口调试工具，启动电源打开系统后，将相关 DMA 驱动挂载，运行应用程序。仿真测试使用了内触发模式，应用程序配置 DMA 传输长度为 128，通过 JTAG 连接 VIVADO 的 ILA 集成逻辑分析仪和串口调试工具观察机箱所测得的数据。如图 14 所示，VIVADO 中的 ILA 能够正确显示信号发生器所给波形，同时 PS 端也能够正确接收到 PL 端所传数据并显示出来，说明系统能够正确采集数据并进行传输。

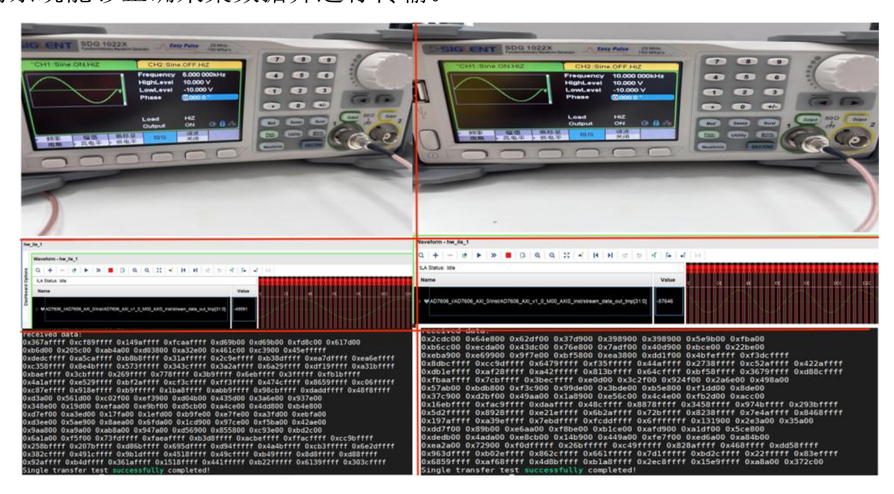


图 14　信号发生器仿真结果

现场测试由 ECR 离子源引出 20keV 的连续束，经过 LEBT 的匹配传输后，通过 chopper 将直流束斩为 50us 的窄脉冲信号进入下游 RFQ 腔并加速到 2.1MeV 最后进入到 MEBT。将常温前端 3 个 CT 探测器的前端电子学的输出接入到数据获取机箱，通过中控室的上位机系

统界面观测机箱所测得的束流强度信息。

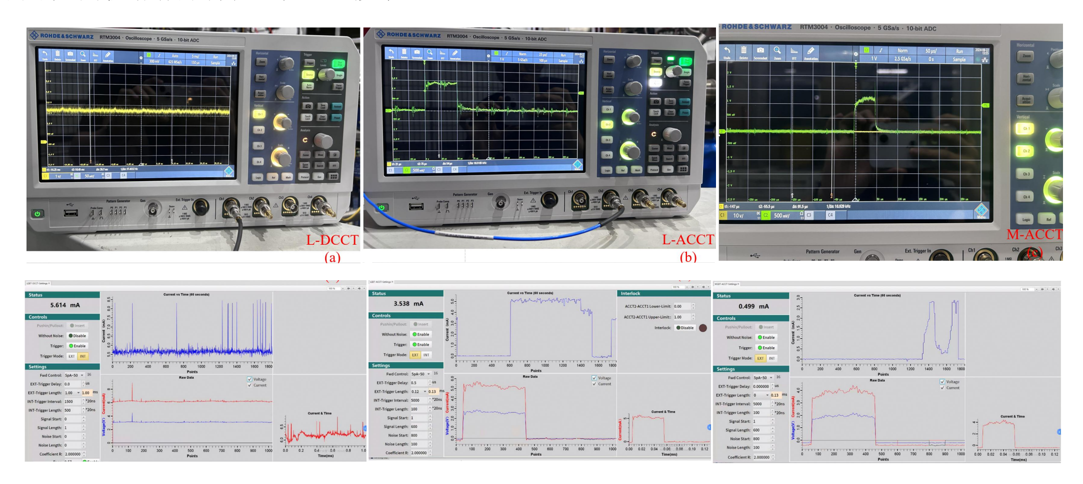


图 15　现场测试结果对比

如图 15 所示，上半部分为示波器直连 CT 前端电子学的输出结果，下半部分为数据获取机箱的系统界面。当束流通过 DCCT 探测器时，上位机系统界面能够准确观测到 LEBT 段 DCCT 探测器的直流信号；当束流经过 ACCT 探测器时，上位机设置为外部触发模式，上位机系统界面也能完整观测到 LEBT 和 MEBT 的 ACCT 的脉冲束波形。结果显示三个通道可同时采集数据并成功发布采集数据，显示结果和现场示波器测得结果一致，满足现场需求。

6 小结

常温前端束流信号数据获取系统采用 ZYNQ 平台外接 ADC 板卡，实现了对常温前端多个束流信号探测器的数据获取和网络传输。通过对 ZYNQ SOC 上的 PL 端逻辑编程和 PS 端嵌入式软件设计，实现了对束线不同段束流信号的同步获取、上传和在线显示。整套系统已在现场部署，运行稳定可靠，为常温前端束流品质优化研究提供了有力的技术支撑。同时，随着加速器设备的不断进步，数据获取系统可以在数据采集方面选择更高精度的 ADC 采集板卡，以满足对更高加速频率束流信号的采集，同时，在数据处理部分也可以加入一些数字滤波算法和自动标定技术，以增加对噪音本底数据的自动化处理功能，进一步提升系统获取和处理数据的能力。

参考文献：

[1] XU Hushan，ZHAN Wenlong，XIAO Guoqing，et al.Progress and prospect of the construction of HIAF and CiADS, major national science and technology infrastructures[J].Nuclear Physics Review,2024,41(01):60-66(in Chinese).（徐瑚珊，詹文龙，肖国青，等．国家重大科技基础设施 HIAF 及 CiADS 建设进展与展望[J].原子核物理评论，2024，41(01)：60-66.doi:10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC81.）

[2] XIAO Guoqing，XU Hushan，WANG Sicheng.Progress and outlook of HIAF and CiADS projects[J].Nuclear Physics Review,2017, 34(03): 275-83(in Chinese).（肖国青，徐瑚珊，王思成．HIAF 及 CiADS 项目进展与展望[J].

原子核物理评论，2017，34(03)：275-83.doi:10.11804/NuclPhysRev.34.03.275.）
[3] Wang R ,Qian C ,Guo Y , et al.Automatic spectrum recognition system for charge state analysis in electron cyclotron resonance ion sources[J].Nuclear Science and Techniques,2023,34(11):203-215.doi:https://doi.org/10.1007/s41365-023-01326-9
[4] 陈伟龙. 面向高功率超导直线加速器的常温前端束线关键问题研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所),2021.DOI:10.27560/d.cnki.gkjwc.2021.000023.
[5] ZHAO Ji Jiu，YIN Zhao Sheng.Particle Accelerator Technology[M].Higher Education Press,2006:345-346(in Chinese).赵籍九, 尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 高等教育出版社,2006:345-346.
[6] BISINELLA S. Design and realization of the electronic control unit of a DCCT sensor for beam current measurement of the SPIDER experiment[J].
[7] REJU K, JOSHI K D. Design and analysis of second harmonic modulator for dc current transformer[C] 2007.
[8] Wang Dongxing, Zhu Yanyan, Zhou Liren, et al. Grey correlation analysis of temperature drift related factors in magnetic modulation DCCT[J].High Power Laser and Particle Beams,2021,33(03):74-81(in Chinese).(王东兴, 朱燕燕, 周力任, 等. 磁调制 DCCT 温漂相关因素灰色关联分析[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(03):74-81. doi:10.11884/HPLPB202133.200286.)
[9] WANG Dongxing，ZHU Yanyan，LI Rui，et al.DCCT linearity error measurement method based on open-loop gain[J].Journal of Northwest University(Natural Science Edition),2018,48(03):343-348.（in Chinese）.（王东兴, 朱燕燕, 李瑞, 等. 基于开环增益的 DCCT 线性误差测量方法[J]. 西北大学学报(自然科学版)，2018，48(03)：343-348.doi:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2018-03-004
[10] Long Jiaoyan, Yuan Jin, Xiao Guoqing. Beam intensity detection transformer[J].Nuclear Physics Review,2002,(01):73-75(in Chinese).(龙娇艳, 原有进, 肖国青. 束流强度探测变压器[J]. 原子核物理评论,2002,(01):73-75.doi:10.3969/j.issn.1007-4627.2002.01.016.)
[11] Xie Hongming, Wu Junxia, Mao Lijun, et al. A non-interceptor residual gas ionization beam profile detector applied to HIRFL-CSR[J].Nuclear Physics Review,2017,4:773-778(in Chinese)(谢宏明, 武军霞, 冒立军, 等. 一种应用于 HIRFL-CSR 上的非拦截式剩余气体电离束流剖面探测器[J]. 原子核物理评论, 2017,34(04):773-778)
[12] 侯明阳, 郭玉辉, 杨旭辉, 杨贵进. 基于边缘加速节点的直线加速器束流轨道参数预测技术研究. 中国科学院科技论文预发布平台 https://chinaxiv.org/202311.00053.[ChinaXiv:202311.00053V2]
[13] ZHANG Demin，JIN Xiao，LI Ming，et al.Application of EPICS in accelerator control systems[J]High power lasers and particle beams,2008,(04):597-600(in Chinese).（张德敏, 金晓, 黎明, 等. EPICS 在加速器控制系统中的应用[J]. 强激光与粒子束，2008，(04)：597-600.）
[14] LI Min,NIE Yonggan,LI Shengpeng,et al.Upgrade of CSRe beam diagnostic control system based on EPICS[J].High Power Laser and Particle Beam,2019,31(12):99-106(in Chinese).(李敏, 聂勇敢, 李生鹏, 等. 基于 EPICS 的 CSRe 束流诊断控制系统升级[J].强激光与粒子束,2019,31(12):99-106.doi:10.11884/HPLPB201931.190144.)
[15] YANG Shian，WANG Zicheng.Design of data acquisition and display system based on Zynq-7000[J]Instrumentation technology and sensors,2020,(08):61-64(in Chinese).（杨诗安, 王子成. 基于 Zynq-7000 的数据采集与显示系统的设计[J]，仪表技术与传感器，2020，(08)：61-64.）
[16] 8-Channel DAS with 18-Bit, 1 MSPS Bipolar Input, Simultaneous Sampling ADC Data Sheet[EB/OL]. [2020-11-4]. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad7606c-18.pdf

Design of Beam Signal Data Acquisition System for the CiADS Room-Temperature Front-End Accelerator Based on ZYNQ[2]

SUN Wei[1,2]，GUO Yuhui[2]，ZHOU Detai[2],WANG Kaili[2,4]，

CHEN Weilong[2]，YANG Jiming[2,3]，WANG Tao[1,#]

（1．*Northwest Normal University,Lanzhou 730000*;

2.*Institute of Modern Physics,Chinese Academy of Sciences*,Lanzhou *730000*;

3. *University of Chinese Academy of Sciences,Beijing 101400*;

4. *University of Chinese Academy of Sciences,*Lanzhou *730000*）

Abstract: The room-temperature front-end accelerator is the beam injector for the CiADS (China Initiative Accelerator Driven System) superconducting linear accelerator. During beam tuning , the low-energy beam of the accelerator is most affected by the space charge effect and high-frequency nonlinear action, consequently, the beam quality of the room-temperature front-end accelerator directly control the performance of the entire CiADS . This paper introduces a real-time beam signal data acquisition and display system based on the ZYNQ embedded platform for the room-temperature front-end accelerator beam.The platform utilizes an external ADC data acquisition board to capture beam data from various beam signal detectors in real time. Simultaneously, the ZYNQ embedded platform performs online processing and network transmission of the acquired data. The data upload

---

[2] **Received date:** xxxx-xx-xx; **Revised date:yyy-mm-dd**

Foundation item: China initiative Accelerator Driven System，Approval number:Large Research Infrastructures China initiative Accelerator Driven System (2017-000052-75-01-000590)

Author: Sun Wei(2000—),E-mail:Sw18066166751@163.com

[#]**Corresponding author:** Wang Tao, E-mail: wangtao0428@nwnu.edu.cn

functionality is achieved by integrating the EPICS network transmission IOC software into the embedded operating system. After the field application test, the system can correctly acquire the beam signal data of the room-temperature front-end accelerator and provide graphical display and supports control for inner and outer trigger modes through the upper computer interface. The entire system features a high level of integration, real-time and accurate data acquisition capabilities, and provides essential data support and technical guarantee for subsequent beam physics experiments and beam diagnostics.

Key words: Beam diagnostics; ZYNQ; Data acquisition system; EPICS